

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED PHYSICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.362949

DESIGN OF AN INTELLIGENT MULTI-CHANNEL SENSOR FOR EARLY DETECTION OF THERMAL DECOMPOSITION IN A LITHIUM-ION BATTERY (p. 6–16)**Andrii Kushnir**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6946-8395>**Oleksandr Lazarenko**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0500-0598>**Roman Tatsiy**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-2528>**Oleh Bashynskiy**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0243-7519>**Roman Aleshko**Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
Kleparivska str., 35, Lviv, Ukraine, 79007
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6396-6061>

This study explores a process underlying the onset and evolution of an irreversible thermochemical reaction that fills a lithium-ion battery (LIB) internally. The issue related to early detection of the onset of thermal decomposition of LIB internal filling is that today there are no unified approaches and clearly defined parameters that would make it possible to predict the failure of LIB. The process of LIB thermal decomposition can occur without visual signs and rapidly develop into intense combustion. Obtaining parameters for the onset of the evolution of LIB's internal filling thermochemical reaction provides prerequisites for designing a sensor for early detection of LIB thermal decomposition.

Based on the results from analytical processing of existing experimental studies on determining the chemical composition of the products of LIB thermal decomposition, the basic parameters have been established. In particular, the change in the concentration of CO₂, HF, and P_{abs} was found to be the basis for further advancement of the model (mathematical basis) of the fuzzy correction unit.

A fuzzy correction module using the Mamdani algorithm has been designed for a multi-channel sensor for early detection of thermal decomposition (SEDTD) in LIB. The forms and parameters of the input and output membership functions have been established. A database of fuzzy rules has been compiled that describe LIB's possible states. Simulation in the Fuzzy Logic Toolbox package in the MATLAB environment (USA) qualitatively reflects the perception of input signals about the onset and evolution of a thermochemical reaction.

The results of simulation studies have confirmed the effectiveness of the proposed approach. It has been established that the sensor, based on a comprehensive analysis of input parameters such as pressure, CO₂ and HF concentrations, forms an information output signal that adequately reflects the technical condition of LIB, in particular normal, pre-fire (pre-emergency), and fire (emergency) states.

Keywords: lithium-ion battery, sensor, combustion, thermal decomposition, triggering algorithm, Fuzzy Logic.

References

- Janik, P., Tępiński, J. (2025). Fire Safety of Lithium-Ion Battery Warehouses – Challenges and Dilemmas. *Safety & Fire Technology*, 65 (1), 98–107. <https://doi.org/10.12845/sft.65.1.2025.8>
- Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitat, V., Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>
- Management of lithium-ion battery safety risks: A literature review of current knowledge and best practices (2025). SARET Research Program. Available at: https://www.fire.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0018/8316/SARET-Report-001-Management-of-Lithium-ion-Battery-Safety-Risks-A-Literature-Review-of-Current-Knowledge-and-Best-Practices-V1.0.pdf
- Wang, J., Jia, J., Zhang, Z. (2022). Research on the Early Warning Mechanism for Thermal Runaway of Lithium-Ion Power Batteries in Electric Vehicles. *Security and Communication Networks*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/8573396>
- Zhang, J., Li, Z., Huang, L. (2026). A Review of Gas-Sensitive Materials for Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Monitoring. *Molecules*, 31 (2), 347. <https://doi.org/10.3390/molecules31020347>
- Han, D., Wang, J., Yin, C., Zhao, Y. (2025). Advances in Early Warning of Thermal Runaway in Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems. *Advanced Sensor Research*, 4 (5). <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>
- Wang, K., Ouyang, D., Qian, X., Yuan, S., Chang, C., Zhang, J., Liu, Y. (2023). Early Warning Method and Fire Extinguishing Technology of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: A Review. *Energies*, 16 (7), 2960. <https://doi.org/10.3390/en16072960>
- Wu, Y., Wang, Y., Yung, W. K. C., Pecht, M. (2019). Ultrasonic Health Monitoring of Lithium-Ion Batteries. *Electronics*, 8 (7), 751. <https://doi.org/10.3390/electronics8070751>
- Yang, L., Li, N., Hu, L., Wang, S., Wang, L., Zhou, J., Song, W.-L. et al. (2021). Internal field study of 21700 battery based on long-life embedded wireless temperature sensor. *Acta Mechanica Sinica*, 37 (6), 895–901. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01103-0>
- Dong, P., Liu, Z., Wu, P., Li, Z., Wang, Z., Zhang, J. (2021). Reliable and Early Warning of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Based on Electrochemical Impedance Spectrum. *Journal of the Electrochemical Society*, 168 (9), 90529. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac239b>
- Xie, Z., Zhang, Y., Wang, H., Li, P., Shi, J., Zhang, X., Li, S. (2024). The Multi-Parameter Fusion Early Warning Method for Lithium Battery Thermal Runaway Based on Cloud Model and Dempster-Shafer Evidence Theory. *Batteries*, 10 (9), 325. <https://doi.org/10.3390/batteries10090325>
- Miao, H. (2024). Research on accurate fire detection & early warning model for lithium-ion battery packs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2703 (1), 12068. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2703/1/012068>
- Zhang, L., Wu, Q., Wang, L., Lyu, L., Jiang, L., Shi, Y. (2025). Research on GRU-LSTM-Based Early Warning Method for Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Voltage Fault Classification. *Energies*, 18 (6), 1315. <https://doi.org/10.3390/en18061315>
- Zhao, L., Watanabe, I., Doi, T., Okada, S., Yamaki, J.-i. (2006). TG-MS analysis of solid electrolyte interphase (SEI) on graphite negative-electrode in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 161 (2), 1275–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.05.045>
- Yang, H., Bang, H., Amine, K., Prakash, J. (2005). Investigations of the Exothermic Reactions of Natural Graphite Anode for Li-Ion Batteries

- during Thermal Runaway. *Journal of the Electrochemical Society*, 152 (1), A73. <https://doi.org/10.1149/1.1836126>
16. Gachot, G., Ribière, P., Mathiron, D., Grugeon, S., Armand, M., Leriche, J.-B. et al. (2010). Gas Chromatography/Mass Spectrometry As a Suitable Tool for the Li-Ion Battery Electrolyte Degradation Mechanisms Study. *Analytical Chemistry*, 83 (2), 478–485. <https://doi.org/10.1021/ac101948u>
 17. Arai, H., Tsuda, M., Saito, K., Hayashi, M., Sakurai, Y. (2002). Thermal Reactions Between Delithiated Lithium Nickelate and Electrolyte Solutions. *Journal of the Electrochemical Society*, 149 (4), A401. <https://doi.org/10.1149/1.1452114>
 18. Ping, P., Kong, D., Zhang, J., Wen, R., Wen, J. (2018). Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating. *Journal of Power Sources*, 398, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>
 19. Bugryniec, P. J., Vernuccio, S., Brown, S. F. (2023). Towards a micro-kinetic model of Li-ion battery thermal runaway — Reaction network analysis of dimethyl carbonate thermal decomposition. *Journal of Power Sources*, 580, 233394. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233394>
 20. Sun, W., Yang, B., Hansen, N., Westbrook, C. K., Zhang, F., Wang, G., Moshhammer, K., Law, C. K. (2016). An experimental and kinetic modeling study on dimethyl carbonate (DMC) pyrolysis and combustion. *Combustion and Flame*, 164, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.11.019>
 21. Fernandes, Y., Bry, A., de Persis, S. (2019). Thermal degradation analyses of carbonate solvents used in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.077>
 22. Ubaldi, S., Conti, M., Marra, F., Russo, P. (2023). Identification of Key Events and Emissions during Thermal Abuse Testing on NCA 18650 Cells. *Energies*, 16 (7), 3250. <https://doi.org/10.3390/en16073250>
 23. Kushnir, A., Kopchak, B. (2019). Development of Intelligent Point Multi-Sensor Fire Detector with Fuzzy Correction Block. 2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 41–45. <https://doi.org/10.1109/memstech.2019.8817395>
 24. Kushnir, A., Kopchak, B. (2021). Development of Multiband Flame Detector with Fuzzy Correction Block. 2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 58–63. <https://doi.org/10.1109/memstech53091.2021.9468075>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364568

DETERMINING THE EFFECT OF ACTIVE LOSSES ON THE THERMAL STATE OF A HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET MOTOR (p. 17–25)

Mykhailo Kovalenko

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>

Yurii Haidenko

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-2812>

Serhii Tsyvinskyi

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2800-6709>

Oleksandr Semeniuk

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9959-4041>

Oleh Bazarov

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>

This study considers a high-speed permanent magnet motor designed to drive unmanned aerial vehicles and ground robotic systems. The scientific-practical task addressed is to establish a quantitative relationship between the components of electromagnetic losses and the thermal state of the motor in a wide range of operating modes (5000–23000 rpm, 1–54 A).

A multiphysics numerical field mathematical model of a small-sized high-speed permanent magnet motor operating as part of an unmanned aerial vehicle has been constructed. The model resolves a coupled electromagnetic-thermal problem refining the temperature field distribution and parameters of active materials: the dependence of the residual magnetic induction of permanent magnets.

It was found that the distribution of specific losses in the cross section is deeply uneven: the maximum values are concentrated at the edges of the stator teeth and exceed the losses in the permanent magnets and yoke by 1.5–2.5 orders of magnitude. The distribution of the thermal field with increasing current was established: at $I \leq 14$ A, magnetic losses prevail, and at $I > 27$ A, losses in the winding become predominant and reach 201 W at a current of 54 A. This is 2.5–3.5 times more than magnetic losses. With increasing current, the loss curves for different speeds gradually coincide: at $I = 54$ A, the difference between 5000 and 23000 rpm is only ≈ 20 W ($\approx 7\%$ of the total losses of 260–280 W).

At speeds above 17,000 rpm, the temperature of permanent magnets exceeds 80°C, the residual induction decreases by 6–8% of the rated value, which leads to a decrease in the electromagnetic torque by 3–4%. A critical value of the average motor heating has been established, at which the risk of irreversible demagnetization of magnets occurs, which corresponds to $\approx 216^\circ\text{C}$, at a speed of $n > 11,000$ rpm and at maximum current.

The results could be used to optimize high-speed motors with permanent magnets.

Keywords: high-speed motor, losses in the magnetic core, multiphysics model, thermal state.

References

1. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Falchenko, M., Kovalenko, M. (2022). Development of control algorithms for magnetoelectric generator with axial magnetic flux and double stator based on mathematical modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (120)), 6–17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.267265>
2. Shen, Q., Zhou, Z., Li, S., Liao, X., Wang, T., He, X., Zhang, J. (2022). Design and Analysis of the High-Speed Permanent Magnet Motors: A Review on the State of the Art. *Machines*, 10 (7), 549. <https://doi.org/10.3390/machines10070549>
3. Li, Z., Wang, P., Liu, L., Xu, Q., Che, S., Zhang, L. et al. (2022). Loss calculation and thermal analysis of ultra-high speed permanent magnet motor. *Heliyon*, 8 (11), e11350. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11350>
4. Gundabattini, E., Mystkowski, A. (2021). Review of air-cooling strategies, combinations and thermal analysis (experimental and analytical) of a permanent magnet synchronous motor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236 (1), 655–668. <https://doi.org/10.1177/0954406220987267>
5. Meng, T., Zhang, P. (2021). A Review of Thermal Monitoring Techniques for Radial Permanent Magnet Machines. *Machines*, 10 (1), 18. <https://doi.org/10.3390/machines10010018>
6. Du, J., Li, C., Zhao, J., Ren, H., Zhang, K., Song, X., Chen, L. et al. (2022). Investigation of Eddy Current Loss and Structure Design with

- Magnetic-Thermal Coupling for Toothless BLDC High-Speed PM Motor. *Machines*, 10 (2), 118. <https://doi.org/10.3390/machines10020118>
7. Dong, J., Huang, Y., Jin, L., Lin, H., Yang, H. (2014). Thermal Optimization of a High-Speed Permanent Magnet Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (2), 749–752. <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2285017>
 8. Zhang, M., Luo, S., Liu, X., Li, W. (2021). The eddy current loss segmentation model of permanent magnet for temperature analysis in high-speed permanent magnet motor. *IET Power Electronics*, 14 (4), 751–759. <https://doi.org/10.1049/pe12.12009>
 9. Pan, B., Tao, D., Ge, B., Wang, L., Hou, P. (2022). Analysis of Eddy Current Loss of 120-kW High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor. *Machines*, 10 (5), 346. <https://doi.org/10.3390/machines10050346>
 10. Yu, Y., Liang, D., Liu, X. (2017). Optimal Design of the Rotor Structure of a HSPMSM Based on Analytic Calculation of Eddy Current Losses. *Energies*, 10 (4), 551. <https://doi.org/10.3390/en10040551>
 11. Jumayev, S., Merdzan, M., Boynov, K. O., Paulides, J. J. H., Pyrhonen, J., Lomonova, E. A. (2015). The Effect of PWM on Rotor Eddy-Current Losses in High-Speed Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (11), 1–4. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2438637>
 12. Schmidt, E., Kaltenbacher, M., Wolfschluckner, A. (2017). Eddy current losses in permanent magnets of surface mounted permanent magnet synchronous machines – Analytical calculation and high order finite element analyses. *E & I Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 134 (2), 148–155. <https://doi.org/10.1007/s00502-017-0498-y>
 13. Kovalenko, M., Tkachuk, I., Kovalenko, I., Zhuk, S., Kryshnov, O. (2024). Double stator axial flux magnetoelectric generator for conversion of low potential mechanical energy. *Vidnovluvana Energetika*, 2 (77), 13–20. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).13-20](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).13-20)
 14. Moradian, K., Sheikholeslami, T. F., Raghobi, M. (2022). Investigation of a spherical pendulum electromagnetic generator for harvesting energy from environmental vibrations and optimization using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 266, 115824. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115824>
 15. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. (2020). Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (103)), 30–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364576

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF HEAT EXCHANGE IN SEMI-INFINITE ENVIRONMENTS WITH FOREIGN INCLUSIONS (p. 26–35)

Vasyl Havrysh

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3092-2279>

Svitlana Yatsyshyn

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5200-4837>

Halyna Klym

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-0649>

Mykhailo Stepaniak

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1859-4495>

Mihaylo Klymiuk

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4344-2816>

This study investigates heat transfer processes in isotropic semi-infinite 3D media with foreign inclusions, which are heated by internal sources and heat flow.

As a result of the thermal load during the operation of devices, significant temperature gradients arise. To analyze the temperature regimes and establish the effective operation of these devices, mathematical models for determining temperature fields have been constructed.

Based on the stated boundary value problems of thermal conductivity, their analytical solutions have been derived, which make it possible to obtain the temperature distribution and the behavior of temperature gradients in a heterogeneous medium. Using these solutions, numerical calculations of the temperature distribution in spatial coordinates for given geometric and thermophysical parameters have been performed.

For an effective description of the thermophysical parameters of heterogeneous semi-infinite 3D media, a symmetric unit function and the Dirac delta function have been used. As a result, second-order differential equations with partial derivatives and singular coefficients have been derived.

The numerical results reflect the temperature distribution in semi-infinite 3D media in spatial coordinates for the given geometric and thermophysical parameters. The numerical values of temperature for the selected half-space material (ceramics VK94-I) and inclusions (silicon, molybdenum) were obtained with an accuracy of 10^{-6} .

The application of the constructed mathematical models of heat transfer contributes to investigating the thermal stability in semi-infinite 3D media with foreign inclusions. Using these models makes it possible to predict temperature regimes in devices, which is a prerequisite for improving their reliability and durability.

Keywords: temperature field, thermal conductivity of the material, thermal stability of structures, convective heat transfer, heat flow.

References

1. Yang, W., Zhou, Q., Zhai, Y., Lyu, D., Huang, Y., Wang, J. et al. (2019). Semi-analytical solution for steady state heat conduction in a heterogeneous half space with embedded cuboidal inhomogeneity. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 326–338. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.02.019>
2. Wang, L., Guo, J., Wang, J. (2023). A continuum mixture model for transient heat conduction in multi-phase composites. *International Journal of Engineering Science*, 193, 103934. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2023.103934>
3. Yang, W., Xiong, C., Zhou, Q., Huang, Y., Wang, J., Zhu, J. et al. (2020). Effects of friction heating on a half space involving ellipsoidal inclusions with non-uniform eigentemperature gradients. *International Journal of Thermal Sciences*, 151, 106278. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106278>
4. Ecsedi, I., Lengyel, Á. J. (2022). Neutral Inhomogeneities in a Two-dimensional Steady-state Heat Conduction Problem. *Wseas Transactions on Heat and Mass Transfer*, 17, 136–140. <https://doi.org/10.37394/232012.2022.17.15>
5. Krysko, A., Awrejcewicz, J., Bodyagina, K., Makseev, A., Zhigalov, M., Krysko, V. (2021). Identifying inclusions in a non-uniform thermally conductive plate under external flows and internal heat sources using topological optimization. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 27 (9), 1649–1671. <https://doi.org/10.1177/10812865211048522>
6. Wu, C., Wang, T., Yin, H. (2025). Eshelby's inclusion and inhomogeneity problems under harmonic heat transfer. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 481 (2318). <https://doi.org/10.1098/rspa.2024.0824>
7. Ding, G., Li, P., Luo, X., Zhou, Q., Zhu, H., Zhang, Q., Liu, Y. (2025). Semi-analytical method for thermal field analysis of multiple arbi-

- trarily shaped inhomogeneities in heterogeneous geological media. *Computers & Geosciences*, 205, 106025. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2025.106025>
8. Çetin, B., Kuşcu, Y. F., Çetin, B., Tümüklü, Ö., Cole, K. D. (2021). Semi-analytical source (SAS) method for 3-D transient heat conduction problems with moving heat source of arbitrary shape. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 165, 120692. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120692>
 9. Channouf, S., Benhamou, J., Jami, M. (2024). Investigating convective and conductive heat transfer in square and circular heated bodies: A novel approach using coupled Runge-Kutta and lattice Boltzmann method. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102441. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102441>
 10. Łach, Ł., Svyetlichnyy, D. (2025). Advances in Numerical Modeling for Heat Transfer and Thermal Management: A Review of Computational Approaches and Environmental Impacts. *Energies*, 18 (5), 1302. <https://doi.org/10.3390/en18051302>
 11. Zhang, Z., Zhou, D., Fang, H., Zhang, J., Li, X. (2021). Analysis of layered rectangular plates under thermo-mechanical loads considering temperature-dependent material properties. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.036>
 12. Brociek, R., Hetmaniok, E., Słota, D. (2024). Numerical Solution for the Heat Conduction Model with a Fractional Derivative and Temperature-Dependent Parameters. *Symmetry*, 16 (6), 667. <https://doi.org/10.3390/sym16060667>
 13. Havrysh, V. I. (2015). Nonlinear Boundary-Value Problem of Heat Conduction for a Layered Plate with Inclusion. *Materials Science*, 51 (3), 331–339. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9846-4>
 14. Havrysh, V., Kochan, V. (2023). Mathematical Models to Determine Temperature Fields in Heterogeneous Elements of Digital Devices with Thermal Sensitivity Taken into Account. 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 983–991. <https://doi.org/10.1109/idaacs58523.2023.10348875>
 15. Havrysh, V., Kolyasa, L. (2026). Mathematical modeling and analysis of heat transfer in structures with foreign elements. *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 34–42. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-1/034>
 16. Havrysh, V., Ivasyk, H., Kolyasa, L., Ovchar, I., Pelekh, Y., Bilas, O. (2017). Examining the temperature fields in flat piecewise-uniform structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (86)), 23–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97272>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363988

CONSTRUCTION OF A TWO-PHASE MODEL FOR HEATING BIOLOGICAL TISSUE AND ELECTROSURGICAL INSTRUMENTS WITH A SPLIT ELECTRODE (p. 36–46)

Alexei Lebedev

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8692-6677>

Vladyslav Shlykov

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8836-4658>

Andrii Dubko

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic University, Kyiv, Ukraine
E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6070-3945>

Stanislav Popov

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1518-6824>

This study develops a two-phase model for heating biological tissue and electrosurgical instruments with a split electrode in the ANSYS program (USA). The distribution of voltage, temperature in the tissue and instruments depending on time and the thickness of the dielectric between the electrodes has been obtained. The dependences of the coagulation area of the parenchyma on the distance between the electrodes and voltage have been determined.

At a dielectric thickness of 3 mm, the tissue is heated to a maximum temperature of 100°C near the ends of the electrodes. Between the electrodes, the temperature decreases to 80–89°C. Coagulation of the tissue begins at a normal temperature of about 80°C. The coagulation zone has a semicircular shape with a width of 6–7 mm and a maximum depth of about 1–1.5 mm.

The resulting model makes it possible to determine the optimal thickness of the dielectric, voltage, and speed of movement of the instrument depending on the diameter of the electrodes and the properties of the tissue. For an electrode diameter of 6 mm, the optimal dielectric thickness is 2–3 mm, voltage – 20–30 V, average speed of movement – 20–30 mm/s. The greatest depth of coagulation and speed of movement of the tool can be obtained at an insulating washer thickness of 3 mm. If the hemostasis zone is within the surgeon's visibility, s/he manually adjusts the voltage and speed of movement of the tool. If the hemostasis zone is hidden from the surgeon, it is necessary to use automatic control systems.

The results are used for the design of electrosurgical tools and technologies.

Keywords: electrosurgery, welding of living tissues, hemostasis, electrosurgical instruments, split electrode, ANSYS.

References

1. Krivtun, I., Kvasnytskyi, V., Maksimov, S. (2023). Welding in medicine applications. *Welding of Metallic Materials*, 399–429. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00008-0>
2. Lebedev, A. V., Dubko, A. G. (2020). Use of Electric Welding of Living Tissues in Surgery (review). *Biomedical Engineering*, 54 (1), 73–78. <https://doi.org/10.1007/s10527-020-09977-3>
3. Kosakivskyi, A., Kosakivska, I. (2023). Vykorystannia elektrozvarivulnoi tekhnolohiyi pry zakhvoriuvanniakh limfohlotkovoho kiltisia u ditei. Kyiv: NUOZ Ukrainy imeni P.L. Shupyka, 248. Available at: <https://www.nuozu.edu.ua/n/p/11052-monohrafiia-vykorystannia- elektrozvarivulnoi-tekhnolohii-pry-zakhvoriuvanniakh-limfohlotkovoho-kiltisia-u-ditei#gsc.tab=0>
4. Umanets, N., Pasychnikova, N. V., Naumenko, V. A., Henrich, P. B. (2014). High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 252 (11), 1697–1703. <https://doi.org/10.1007/s00417-014-2709-0>
5. Umanets, N. (2016). High-frequency electric welding of biological tissues versus diode laser photocoagulation as intraoperative retinopexy in vitrectomy for rhegmatogenous retinal detachment. *Oftalmologicheskii Zhurnal*, 63 (5), 14–17. <https://doi.org/10.31288/oftalmolzh201651417>
6. Umanets, N., Pasychnikova, N., Naumenko, V., Maletskyi, A., Chabotarev, E., Pukhlik, E. (2016). Endoresection of choroidal melanoma using high-frequency electric welding of biological tissues. *Oftalmologicheskii Zhurnal*, 62 (4), 11–14. <https://doi.org/10.31288/oftalmolzh201641114>
7. Krestianov, M. Y., Kunin, D. D., Savytska, I. M., Heilenko, O. A., Kalashnikov, V. A. (2025). Effects of bio-welding on small intestine tissues in automatic mode using artificial intelligence algorithms. *The Ukrainian Journal of Clinical Surgery*, 92(2), 55–59. <https://doi.org/10.26779/2786-832x.2025.2.55>
8. Muzychenko, P. F., Chernyak, V. A., Savosko, S. I., Lankin, Yu. N., Karpenko, K. K., Dubenko, D. E. et al. (2021). Morphological Assess-

- ment of Vascular Anastomoses Performed Using High Frequency Electric Welding. *International Journal of Morphology*, 39 (4), 1183–1189. <https://doi.org/10.4067/s0717-95022021000401183>
9. Yin, L., Zhu, C., Xu, J., Zhao, H., Qiu, J., Wang, H., Liu, K. (2022). Dynamic Impedance Analysis of Intestinal Anastomosis during High-Frequency Electric Field Welding Process. *Sensors*, 22 (11), 4101. <https://doi.org/10.3390/s22114101>
 10. Dziuba, I., Bondarenko, Y., Koroliuk, T., Dubko, A., Stepenko, S., Bondarenko, O. (2024). Experimental Determination of Biological Tissue Impedance for Electrosurgical Process. 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 1–7. <https://doi.org/10.1109/mees64070.2024.11405055>
 11. Molotkovets, V. Yu., Medvediev, V. V., Korsak, A. V., Chaikovskiy, Yu. B., Marynsky, G. S., Tsybaliuk, V. I. (2020). Restoration of the Integrity of a Transected Peripheral Nerve with the Use of an Electric Welding Technology. *Neurophysiology*, 52 (1), 31–42. <https://doi.org/10.1007/s11062-020-09848-3>
 12. Zabolotnyi, D., Kvasha, O. (2023). Biophysical evaluation of the effectiveness of high-frequency bipolar electric welding for closing defects in the dura mater in frontal sinus tumours with intracranial spread. *Bulletin of Medical and Biological Research*, 17 (3), 16–24. <https://doi.org/10.61751/bmbr.2706-6290.2023.3.16>
 13. Zabolotnyi, D., Kvasha, O. (2023). Experimental development of the method of seamless connection of the dura mater using high-frequency bipolar electric welding and substantiation of its greater tightness, compared to the traditional method of connection using suture material. *Grail of Science*, 31, 447–458. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.15.09.2023.72>
 14. Zabolotnyi, D., Kvasha, O. (2023). Bipolar high-frequency electric welding in radical resection of frontal sinus tumors. *Carcinogenesis*, 44 (2), 175–181. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgad018>
 15. Fomin, P. D., Vasylychenko, V. A., Oparin, S. O., Feleshtynskiy, Ya. P., Chvertko, N. A. (2020). Pat. na korysnu model No. 146869 UA. Elektrokhirurhichnyi instrument dlia endoskopichnykh maloinvazyvnykh operatyvnykh vtruchan v abdominalnyi khirurhiyi. No. u202004787; zaiavl. 27.07.2020, opubl. 31.03.2021. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1585870/>
 16. Dubko, A. G., Chvertko, N. A., Lebedev, O. V. (2021). Electrosurgical instrument for minimally invasive interventions in abdominal surgery. *Biomedical Engineering and Technology*, 6, 11–18. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2021.6.244548>
 17. Wang, H., Yang, X., Madeniyeti, N., Qiu, J., Zhu, C., Yin, L., Liu, K. (2022). Temperature Distribution of Vessel Tissue by High Frequency Electric Welding with Combination Optical Measure and Simulation. *Biosensors*, 12 (4), 209. <https://doi.org/10.3390/bios12040209>
 18. Paton, B. Ye., Lebediev, V. K., Lebediev, O. V. et al. (2007). Pat. No. 29797 UA. Instrument dlia bipoliarnoi vysokochastotnoi koahuliatsiyi zhyvykh miakyykh tkanyh tvaryn i liudyny. No. u200711208; declared: 10.10.2007, published: 25.01.2008. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/312265/>
 19. Lebediev, V. K., Lebediev, O. V., Vasylychenko, V.A., Paton, B. Ye., Bushtedt, Yu. P. (2007). Pat. No. 32967 UA. Elektroinstrument dlia bipoliarnoi vysokochastotnoi koahuliatsiyi zhyvykh miakyykh tkanyh tvaryn i liudyny. № u200800573; declared: 10.10.2007, declared: 10.06.2008. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/315453/>
 20. Kosakivska, I. A. (2020). Surgical Treatment of Chronic Tonsillitis. *Family Medicine*, 1-2, 121–124. <https://doi.org/10.30841/2307-5112.1-2.2020.20460>
 21. Linchevskyy, O., Makarov, A., Getman, V. (2010). Lung sealing using the tissue-welding technology in spontaneous pneumothorax. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 37 (5), 1126–1128. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2009.11.017>
 22. Popovic, Z., Popovic, B. (1999). *Introductory Electromagnetics*. Prentice Hall, 548. Available at: <https://www.scribd.com/doc/92105971/Introductory-Electromagnetics-Z-Popovic-B-Popovic>
 23. Paton, B. E., Lebedev, V. K., Vorona, D. S. et al. (2003). Pat. No. US20040068304 A1. Bonding of soft biological tissues by passing high frequency electric current therethrough. No. 10/673,358; declared: 26.09.2003. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/11/cd/7f/59bce5b450ff56/US20040068304A1.pdf>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.362949

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО БАГАТОКАНАЛЬНОГО ДАВАЧА РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДУ ЛІТІЙ-ІОННОГО ЕЛЕМЕНТА ЖИВЛЕННЯ (с. 6–16)

А. П. Кушнір, О. В. Лазаренко, Р. М. Тацій, О. І. Башинський, Р. В. Алешко

Об'єктом дослідження визначено процес початку та розвитку незворотної термохімічної реакції внутрішнього наповнення літій-іонного елемента живлення (ЛЕЖ). Проблема раннього виявлення початку термічного розкладу внутрішнього наповнення ЛЕЖ полягає в тому, що на сьогодні відсутні єдині підходи та чітко визначенні параметри, що дозволяють спрогнозувати вихід з ладу ЛЕЖ. Процес термічного розкладу ЛЕЖ може протікати без візуальних ознак і стрімко переростати в інтенсивне горіння. Отримання параметрів початку розвитку термохімічної реакції внутрішнього наповнення ЛЕЖ надає передумови для розробки давача раннього виявлення термічного розкладу ЛЕЖ.

За результатами аналітичного опрацювання існуючих експериментальних досліджень з визначення хімічного складу продуктів термічного розкладу ЛЕЖ було встановлено основні параметри. Зокрема, зміна концентрації CO_2 , HF та $P_{\text{абс}}$ було встановлено як основа для подальшої розробки моделі (математичної основи) блока нечіткої корекції.

Розроблено блок нечіткої корекції із використанням алгоритму Мамдані для багатоканального давача раннього виявлення термічного розкладу (ДРВТР) ЛЕЖ. Встановлено форми та параметри вхідних та вихідних функцій належності. Складено базу нечітких правил, які описують можливі стани ЛЕЖ. Симуляція в пакеті Fuzzy Logic Toolbox в середовищі MATLAB (США) якісно відображає сприйняття вхідних сигналів про початок та розвиток термохімічної реакції. Результати симуляційних досліджень підтвердили ефективність запропонованого підходу. Встановлено, що давач на основі комплексного аналізу вхідних параметрів – тиску, концентрації CO_2 та HF – формує інформаційний вихідний сигнал, який адекватно відображає технічний стан ЛЕЖ, зокрема: нормальний, передпожежний (передаварійний) та пожежний (аварійний) стан.

Ключові слова: літій-іонний елемент, давач, горіння, термічний розклад, алгоритм спрацювання, Fuzzy Logic.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364568

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ АКТИВНИХ ВТРАТ НА ТЕПЛОВИЙ СТАН ВИСОКОШВИДКІСНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ (с. 17–25)

М. А. Коваленко, Ю. А. Гайденко, С. С. Цивінський, О. В. Семенюк, О. О. Базаров

Об'єктом дослідження є високошвидкісний двигун із постійними магнітами, призначений для приводу безпілотних літальних апаратів та наземних роботизованих комплексів. Вирішувалась науково-практична проблема встановлення кількісного взаємозв'язку між складовими електромагнітних втрат та тепловим станом двигуна у широкому діапазоні режимів роботи (5000–23000 об/хв, 1–54 А).

Розроблено мультифізичну чисельну польову математичну модель малогабаритного високошвидкісного двигуна із постійними магнітами, що функціонує у складі безпілотного літального апарату. В моделі реалізовано зв'язану електромагнітно-теплову задачу з уточненням розподілу температурного поля та параметрів активних матеріалів: залежності залишкової магнітної індукції постійних магнітів.

Встановлено, що розподіл питомих втрат у поперечному перерізі є глибоко нерівномірним: максимальні значення зосереджені на краях зубців статора і на 1,5–2,5 порядки перевищують втрати в постійних магнітах та ярмі. Встановлено розподіл теплового поля зі збільшенням струму: при $I \leq 14$ А переважають магнітні втрати, а при $I > 27$ А втрати в обмотці стають переважаючими і при струмі 54 А досягають 201 Вт. Це у 2,5–3,5 рази більше, ніж магнітні. Зі зростанням струму криві втрат для різних швидкостей поступово збігаються: при $I = 54$ А різниця між 5000 і 23000 об/хв складає лише ≈ 20 Вт ($\approx 7\%$ від сумарних втрат 260–280 Вт).

При швидкостях понад 17000 об/хв температура постійних магнітів перевищує 80°C , залишкова індукція знижується на 6–8% від номінального значення, що призводить до зменшення електромагнітного моменту на 3–4%. Встановлено критичне значення середнього нагріву двигуна, при якому настає ризик необоротного розмагнічування магнітів, що відповідає $\approx 216^\circ\text{C}$, при швидкості $n > 11000$ об/хв та при максимальному струмі. Отримані результати можливо використовувати для оптимізації високошвидкісних двигунів із постійними магнітами.

Ключові слова: високошвидкісний двигун, втрати в магнітному осерді, мультифізична модель, тепловий стан.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364576

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМІНУ В НАПІВБЕЗМЕЖЕНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ЧУЖОРІДНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ (с. 26–35)

В. І. Гавриш, С. І. Яцишин, Г. І. Клим, М. В. Степаняк, М. М. Клим'юк

Об'єктом дослідження є процеси теплообміну в ізотропних напівбезмежних 3D середовищах із чужорідними включеннями, які піддаються нагріванню внутрішніми джерелами та тепловим потоком.

Внаслідок теплового навантаження при експлуатації пристроїв виникають значні температурні градієнти. Для аналізу температурних режимів та встановлення ефективної роботи цих пристроїв розроблено математичні моделі визначення температурних полів.

На основі сформульованих крайових задач теплопровідності визначено їх аналітичні розв'язки, які дають змогу отримати розподіл температури та поведінку температурних градієнтів у неоднорідному середовищі. Із використанням цих розв'язків виконано числові розрахунки розподілу температури за просторовими координатами для заданих геометричних та теплофізичних параметрів.

Для ефективного опису теплофізичних параметрів неоднорідних напівбезмежних 3D середовищ використано симетричну одичинну функцію та дельта-функцію Дірака. У результаті отримано диференціальні рівняння другого порядку з частковими похідними та сингулярними коефіцієнтами.

Отримані числові результати відображають розподіл температури в напівбезмежних 3D середовищах за просторовими координатами для заданих геометричних та теплофізичних параметрів. Числові значення температури для вибраного матеріалу півпростору (кераміка ВК94-І) та включення (кремній, молібден) отримано з точністю 10^{-6} . Використання розроблених математичних моделей теплообміну сприяє дослідженню термостійкості в напівбезмежних 3D середовищах з чужорідними включеннями. Застосування цих моделей дає можливість прогнозувати температурні режими в пристроях, що є передумовою для підвищення їх надійності та довговічності.

Ключові слова: температурне поле, теплопровідність матеріалу, термостійкість конструкцій, конвективний теплообмін, тепловий потік.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363988

РОЗРОБКА ДВОФАЗНОЇ МОДЕЛІ НАГРІВАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ТКАНИНИ ТА ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНОГО ІНСТРУМЕНТУ З РОЗДІЛЕНИМ ЕЛЕКТРОДОМ (с. 36–43)

О. В. Лебедев, В. В. Шликов, А. Г. Дубко, С. В. Попов

Об'єктом дослідження є розробка двофазної моделі нагрівання біологічної тканини та електрохірургічного інструменту з розділеним електродом у програми ANSYS (США). Отримано розподіл напруги, температури в тканині та інструменті залежно від часу та товщини діелектрика між електродами. Визначені залежності області коагуляції паренхіми від відстані між електродами та напругою. При товщині діелектрика 3 мм тканина нагрівається до максимальної температури 100°C поблизу торців електродів. Між електродами температура зменшується до $80\text{--}89^{\circ}\text{C}$. Коагуляція тканини починається за нормальної температури близько 80°C . Зона коагуляції має напівкруглу форму із шириною 6–7 мм та максимальною глибиною близько 1–1,5 мм. Отримана модель дає можливість визначити оптимальну товщину діелектрика, напруги і швидкості переміщення інструмента від діаметра електродів та властивостей тканини. Для діаметра електродів 6 мм оптимальна товщина діелектрика дорівнює 2–3 мм, напруга 20–30 В, середня швидкість переміщення 20–30 мм/с. Найбільшу глибину коагуляції та швидкості переміщення інструменту можна отримати при товщині ізоляційної шайби 3 мм. Якщо зона гемостазу перебуває у межах видимості для хірурга, він вручну регулює напругу і швидкість руху інструмента. Якщо зона гемостазу прихована від хірурга, необхідно використовувати системи автоматичного управління. Отримані результати використовуються для проектування електрохірургічних інструментів і технологій.

Ключові слова: електрохірургія, зварювання живих тканин, гемостаз, електрохірургічний інструментарій, розділений електрод, ANSYS.